


International Journal of Environment, Agriculture and Biotechnology
Vol-6, Issue-6; Nov-Dec, 2021

Journal Home Page Available: https://ijeab.com/
Journal DOI: 10.22161/ijeab

# Impact of climate change on the water balance of the Sankarani river basin in West Africa

# Impact du changement climatique sur le bilan hydrique du bassin fluvial de Sankarani en Afrique de l'Ouest

Hamidou Diawara[1,2], Tadjouko Berthe[2], Souleymane Bengaly[2], Ekaterina Vladimirovna Gaidukova[3], Korotoumou Sangare[2], Sékoumar Diarra[2]

[1]Centre Régional AGRHYMET (CRA)/CILSS
[2]Université des Sciences Sociales et de Gestion de Bamako (USSGB)
[3]Russian State Hydrometeorological University (RSHU)

Received: 20 Jun 2020; Received in revised form: 11 Sep 2021; Accepted: 18 Nov 2021; Available online: 24 Nov 2021


***Abstract*— *The Sankarani River is a tributary and powerful regulator of the hydrological regime of the Niger River. It plays a big role in the socio-economic development of Mali through the supply of electricity through the hydroelectric power station of Sélingué, its contribution in rice cultivation and fish farming. However, the inflow of water from this river over the past few decades has been very low, due to climate change and the degradation of its watershed. So this study set itself the objective of analyzing the evolution over different periods of the components of Sankarani's water balance. The data used for this are Landsat / OLI and SRTM satellite images, rainfall and temperatures from the NOAA database, and measured stream flows from 1980 to 2013. All these data have been aggregated at the watershed scale before being used to estimate the components of the water balance over two different periods, according to hydrometeorological standards. The Pettitt Test was used on the annual rainfall series to detect 1994 as the year of failure. Thus, the study revealed a strong degradation of the Sankarani watershed following its continuous anthropization, having led to a very remarkable decrease in the runoff coefficient because, in fact, the decrease in rainfall of 8.7% on the period 1995-2009 compared to 1980-1994 resulted in a decrease of 32.6% of the flow rate, of 26.2% of the variation of water reserve and only of 3.9% of evaporation. On the other hand, in terms of the volume of water compared to the average quantity of rain for each period, evaporation was more intensified by 4.3%, unlike the flow and the variation in reserve which, for their part, decreased by 3.5% and 0.9% respectively. The rainfall deficit in the Sankarani watershed was more negative for runoff.*

***Keywords*— Sankarani, Water balance, Flow rate, Watershed degradation.**

## I. INTRODUCTION

La rivière Sankarani est un affluent majeur du fleuve Niger. Grace au puissant barrage hydroélectrique de Sélingué à son embouchure, cette rivière joue un très grand rôle dans le développement socio-économique du Mali. En effet, ce barrage à vocation énergétique, agricole et halieutique à l'origine (Hathie et *al.*, 2017) a fourni 175,54 GWh d'électricité au pays en moyenne par an de 1981 à 2013, pour une productivité annuelle attendue d'environ 230 GWh (Bangneres, 2015). Il permet aussi l'irrigation de plus de 1000 ha de terre depuis 2001. Par ailleurs, depuis la mise en service de cet ouvrage en 1981, globalement l'apport en eau du fleuve Niger à fortement diminué, suscitant l'hypothèse de son probable effet sur le régime du Niger (Hassane et *al.*, 2000; Diawara, 2018). Pourtant,

des études ont montré que les barrages hydroélectriques n'ont pas d'impacts significatifs à long terme sur les écoulements des cours d'eau (Olivry et *al.*, 1995 ; Assani et *al.*, 2002).

Plusieurs études menées sur le fleuve Niger et/ou sur ses affluents, avec ou sans aménagements, ont montrée aussi une diminution considérable des écoulements depuis les grandes sècheresses de la décennie 1970-1980, qui est causée plutôt par la variation de la pluviométrie. Bamba et *al.* (1996) ont trouvé que la diminution des écoulements du fleuve Niger et de ses différents affluents est plus importante que celle des pluies. Aussi, l'étude du bilan hydrologique du fleuve Niger à Koulikoro réalisée par Mahé et *al.* (1997) concluait qu'il y'a eu durant les années 1980, une diminution des écoulements de l'ordre de 55% suite à un déficit pluviométrique de 21%. Enfin durant la même période, selon Paturel et *al.* (2010), les débits moyens annuels de la rivière Bani, un autre affluent du Niger, ont baissé de 65% contre environ de 15% à 25% de diminution de la pluviométrie.

La diminution du coefficient d'écoulement dans le bassin versant du fleuve Niger et ses sous-bassins, démontrée par Mahé et *al.* (1995), et Olivry (2002), explique l'importance de la baisse des écoulements par rapport à celle de la pluie. En effet, cette caractéristique a passé de 19,0% à 15,3% entre les périodes 1961-1970 et 1981-1990 respectivement (Mahé et *al.*, 1995). Cela montre clairement une augmentation du taux des pertes d'eau de pluie dans ces bassins, notamment par l'évaporation et/ou l'infiltration, à l'inverse des écoulements. Les principales causes de cette réalité sont sans doute la dégradation du bassin versant et le changement climatique qui, se caractérisait par la persistance de la sècheresse (Paturel et *al.*, 1998 ; Diawara, 2019) en Afrique de l'Ouest en général, et dans le bassin versant du Sankarani en particulier (Konate, 2003), jusqu'à la dernière décennie du 20e siècle.

Le retour confirmé depuis quelques années d'une période humide en Afrique de l'Ouest sahélienne (Descroix et *al.*, 2015; Nouaceur, 2020) nous amène à se demander quelles sont la situation et les tendances actuelles des ressources en eau de la rivière Sankarani, très utile pour le pays aussi bien sur le plan énergétique que pour son apport important dans la régulation du régime du fleuve Niger, notamment dans le soutien de ses étiages (Olivry et *al.*, 1995; Kuper et *al.*, 2002). Par conséquent, cette étude vise à analyser l'impact du changement climatique sur les éléments du bilan hydrique de la rivière Sankarani.

## II. PRESÉNTATION DU BASSIN VERSANT DE LA RIVIÈRE SANKARANI

La rivière Sankarani est un affluent majeur en rive droite du fleuve Niger en Afrique de l'Ouest, se situant dans le sous bassin du cours supérieur de ce dernier (Fig. 1). Elle prend sa source dans les hauts-plateaux guinéens d'où elle reçoit l'essentiel des eaux qui l'alimentent. En effet, long de 670 km, le Sankarani (le cours d'eau) naît au sud-est de la Guinée par la confluence des rivières Gbanhala et Kourou Kellé, traverse ensuite les territoires de la Côte d'Ivoire et du Mali, où il rejoint le cours principal du fleuve Niger au $160^{e}$ km depuis la source de celui-ci (ORSTOM, 1970). Ainsi, son bassin versant couvre 33 500 $km^2$, soit environ 29,6% du bassin supérieur du fleuve Niger jusqu'à Koulikoro au Mali (ORSTOM, 1970 ; UNESCO/IRD, 2011), et s'étend partiellement sur la Guinée Conakry (65,9%), le Mali (24,2%) et la Côte d'Ivoire (9,9%).

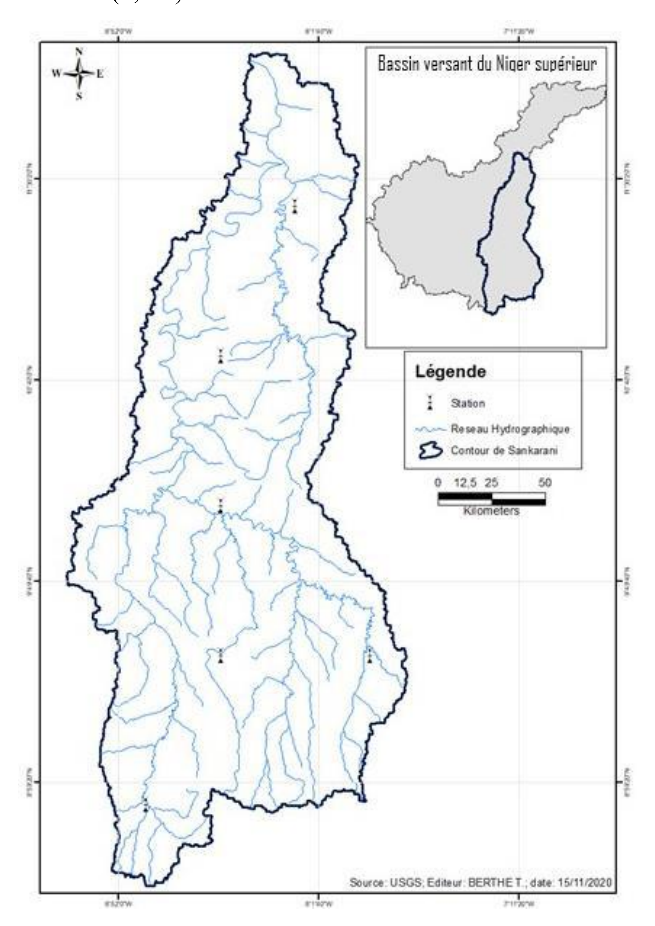



*Fig.1: Carte de localisation du bassin versant de la rivière Sankarani*

Le bassin versant du Sankarani se caractérise par un climat tropical avec l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide pendant laquelle on enregistre en moyenne une lame de pluie de 1100 à 2000 mm/an (Ferry et *al.*, 2018). Cela se reflète aussi sur le régime hydrologique avec des hautes et des basses eaux. En année moyenne, le bassin de Sankarani reçoit 45 $km^3$ d'eau de pluies dont

80,0% de la Guinée, 11,1% du Mali et 8,9% de la Côte d'Ivoire (Andersen et *al.*, 2006).

Le barrage de Sélingué construit de 1980 à 1982, avec un bassin de drainage vaste de 32 140 km$^2$ (soit plus de 90% de la superficie totale du bassin versant de Sankarani), possède une retenue d'eau de 450 km$^2$ de superficie et d'une capacité de stockage de 2,0 à 2,2 km$^3$ selon les sources (Kuper et *al.*, 2002 ; Ferry et *al.*, 2011). Bien que le volume d'eau stocké à Sélingué ne représente que 7,6% des écoulements moyens annuels du fleuve Niger à la station de référence de Koulikoro au Mali, ses débits sortants représentent plus de 50%, voire proches de 100% des débits du Niger à cette station en saison sèche (Kuper et *al.*, 2002). Cela montre la plus grande importance de ce cours d'eau dans la régulation du régime hydrologique du fleuve Niger en général. Ce barrage est multifonctionnel car il assure la production d'électricité grâce à une centrale hydroélectrique installée de 44 MW de puissance, la riziculture sur plus de 1000 ha et la production piscicole d'eau douce (Maïga et *al.*, 2011).

## III. MATÉTIELS ET METHODS D'ANALYSE

### 3.1. Données et outils de traitement

Les données utilisées dans cette étude sont de plusieurs types. Il s'agit :

- des images satellitaires Landsat MSS et OLI des années 1974 et 2019 du mois de décembre, un peu après la fin de la saison des pluies, et SRTM 30 collectées à partir de la base de données de United States Geological Survey (USGS) ;
- des données climatiques journalières maillées (températures max et min, et précipitations) du bassin versant de Sankarani de 1980 à 2013, quant à elles, sont de source National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ;
- et enfin de la série des débits moyens annuels de la rivière Sankarani au niveau de Sélingué sur la période de 1980 à 2013, obtenue grâce aux archives des jaugeages effectués sur le cours d'eau.

Les principaux outils de traitement et d'analyse des données satellitaires utilisées sont GRASS GIS 7.6, ENVI 5.1 et ArcGIS 10.5. Le premier nous a permis de délimiter et d'analyser le bassin versant à partir de SRTM 30. Ensuite, ENVI 5.1 a servi pour le traitement des images Landsat MSS et OLI afin d'analyser les unités d'occupation et d'utilisation du sol du bassin versant. Enfin, ArcGIS10.5 a été utilisé pour la production des cartes.

Pour la détection de l'année de rupture dans la série des précipitations annuelles, l'outil statistique Khronostat a été utilisé.

### 3.2. Méthodes

3.2.1. Traitement des images satellitaires

L'image SRTM 30 a été prétraitée dans ArcGIS 10.5 afin de la restaurer à travers la correction des pixels qui manquaient d'informations ou qui contenaient des erreurs. Sur la base de ce Modèle numérique de terrain (MNT), le bassin versant de la rivière a été délimité et son réseau hydrographique extrait. Et par la suite, nous avons évalué les caractéristiques morphométriques du bassin versant et de son réseau hydrographique.

Afin d'évaluer le degré de dégradation du bassin versant de Sankarani, l'évolution des différentes unités d'occupation du sol a été analysée. Pour les identifier, la méthode de classification supervisée a été privilégiée (Dembélé, 2017), combinant la technique d'interprétation visuelle pour définir les thèmes basiques et le maximum de vraisemblance.

3.2.2. Agrégation des données hydroclimatiques

Les séries de données climatiques journalières (Tmax, Tmin et P) étant sous forme de mailles, nous les avons dans un premier temps générées pour six (06) nœuds, ici nommées stations, répartis de façon homogène en fonction des sous-zones climatiques du bassin versant (Fig.1). Ensuite pour chaque station, elles ont été agrégées à l'échelle mensuelle, puis annuelle selon les normes de traitement de l'OMM (OMM, 2011). La température moyenne annuelle est obtenue en faisant la moyenne de Tmax et Tmin.

A l'échelle du bassin versant, la méthode de la moyenne arithmétique simple nous a permis de calculer la température moyenne annuelle, alors que pour la pluie moyenne annuelle, la méthode des polygones ou méthode de Thiessen (Ouatiki, 2014) a été privilégiée. Ensuite, la rupture dans la série chronologique des précipitations annuelles a été détectée par le Test de Pettitt (Paturel et *al.*, 1995).

3.2.3. Evaluation des composantes du bilan hydrique et analyses

Les différentes composantes du bilan hydrique annuelle du bassin versant analysées dans cette étude sont présentées dans l'équation classique suivante :

$$\Delta R = P - E - h_Q \qquad (1)$$

d'où ΔR - variation de réserve en eau du sol et/ou du sous-sol du bassin versant, en mm ; P – pluie reçue au cours d'une année, en mm ; E – lame d'eau évaporée du bassin versant en une année, en mm ; $h_Q$ – lame d'eau écoulée

(volume d'eau écoulée par unité de surface du bassin versant), en mm.

L'évaporation réelle (E, en mm) pour chaque année a été obtenue par la formule de Turc (Turc, 1955) ci-après présentée, en fonction de la température (T, en ºC) et des précipitations (P, en mm) annuelles :

$$E = \frac{P}{\left(0{,}9 + \frac{P^2}{(0{,}05T^3 + 25T + 300)^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \qquad (2)$$

Enfin la lame d'écoulement par l'exutoire du bassin versant ($h_Q$, en mm) a été évaluée par la formule 3 (Roche, 1963).

$$h_Q = 31{,}54.10^3 \, \frac{Q_{an}}{A} \qquad (3)$$

d'où Qan – le débit moyen annuel à l'exutoire du bassin versant, en $m^3 s^{-1}$ ; A – l'aire (superficie) du bassin versant, en $km^2$.

Les composantes du bilan hydrique du bassin versant ainsi calculées pour chaque année, ont été utilisées pour le bilan moyen pour chacune des périodes définies avant et après la rupture observée dans les précipitations. Et pour déterminer les périodes afin de faire une évaluation comparative du degré de variation des différentes composantes du bilan hydrique d'une période à l'autre, l'indice pluviométrique de Nicholson (Nicholson et *al.*, 1988) ci-après a été utilisé.

$$I_N = \frac{(x_i - \bar{x})}{\sigma} \qquad (3)$$

d'où $I_N$ – l'indice pluviométrique de Nicholson ; $x_i$ – le cumul de pluie de l'année i ; $\bar{x}$ – la pluie moyenne sur la période totale de l'étude.

## IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

### 4.1. Caractéristiques physiographiques du bassin versant

Le bassin versant a été délimité à partir de son exutoire situé au niveau de Sélingué, un peu en amont de sa jonction d'avec le fleuve Niger. Les principales caractéristiques morphométriques pour la compréhension de sa configuration sont récapitulées dans le Tableau 1.

*Tableau 1: Caractéristiques morphométriques du bassin versant de Sankarani*

| Caractéristiques | Valeurs |
|---|---|
| Superficie (A, en $km^2$) | 33 282 |
| Périmètre (P, en km) | 1 550 |
| Indice de compacité ($I_C$) | 2,38 |
| Altitude max (Hmax, en m) | 1 479 |
| Altitude min (Hmin, en m) | 323 |
| Altitude moyenne (Hmoy, en m) | 470 |
| Ordre du réseau hydrographique | 6 |
| Longueur du cours d'eau principal (L, en km) | 679 |
| Densité de drainage (Dd, en $km/km^2$) | 0,37 |
| Densité hydrographique (Dh, en $1/km^2$) | 0,08 |

Avec un indice de compacité supérieur à 2,38, ce bassin versant est de forme très allongée (Laabidi, 2016). La faible valeur de la densité de drainage indique une forte perméabilité du sol du bassin versant (Aoulmit, 2016), donc un taux d'infiltration à la recharge de la nappe d'eau souterraine plus élevé que celui de l'écoulement. Le cours d'eau principal dont la longueur fait 679 km est d'ordre six (6), comme on peut constater sur la Fig. 2, avec deux (2) principaux affluents, quant à eux d'ordre cinq (5).

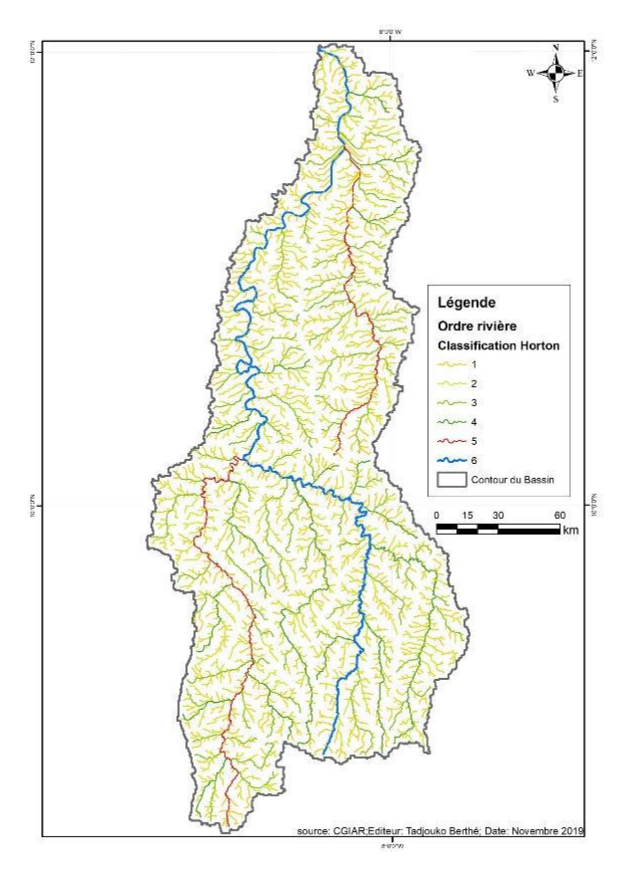
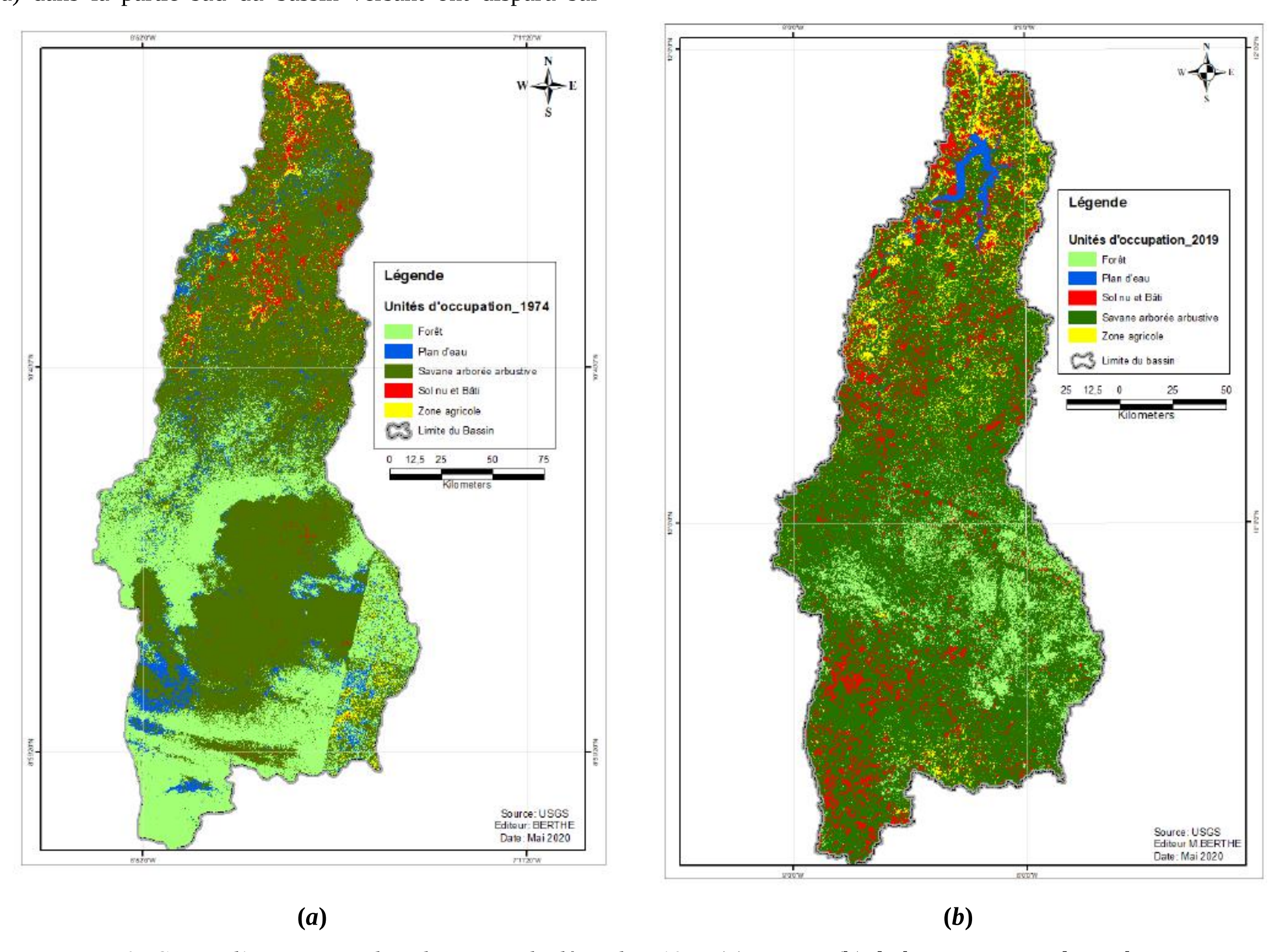



*Fig.2: Réseau hydrographique du bassin versant de Sankarani.*

**4.2. Analyse de l'occupation du sol du bassin versant de Sankarani**

Les résultats des traitements d'images Landsat et OLI de décembre 1974 et 2019 sont présentés sous forme de cartes d'occupation du sol sur la Fig. 3. La comparaison de ces cartes nous informe sur la dynamique des unités d'occupation du sol, qui sont la forêt, le plan d'eau, la savane arborée/arbustive, la zone agricole et le sol nu/bâti.

Ces cartes nous permettent de constater que malgré le maintien des mêmes unités, l'occupation du bassin versant de Sankarani a beaucoup évolué entre 1974 et 2019. Par exemple, plusieurs plans d'eau visibles sur la carte de 1974 (a) dans la partie sud du bassin versant ont disparu sur celle de 2019 (b). Cela s'expliquerait par les effets du changement climatique en Afrique de l'Ouest, plus précisément par la baisse de la pluviométrie (Diawara, 2019). Par contre, nous observons apparaitre un lac proche de l'exutoire du bassin versant qui fait suite à la construction du barrage de Sélingué au début des années 1980. Par ailleurs, les sols nus/bâtis ont fortement augmenté, notamment dans la partie sud du bassin où ils étaient jadis inexistants.




(*a*) (*b*)

*Fig. 3: Cartes d'occupation du sol au mois de décembre 1974 (a) et 2019 (b) du bassin versant de Sankarani.*

Les statistiques sur l'évolution des différentes unités d'occupation du bassin versant de Sankarani sont présentées sous forme de graphique sur la Fig. 4.

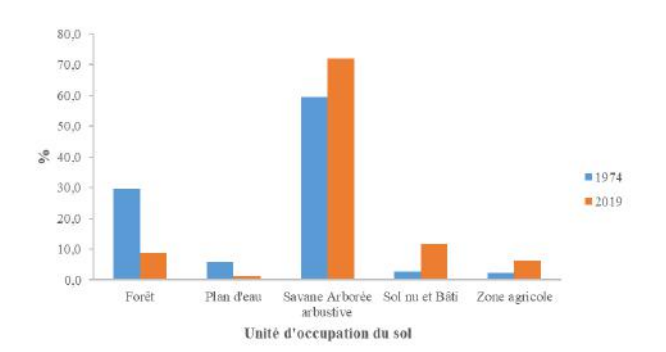



*Fig. 4: Evolution des unités d'occupation du sol du bassin versant de Sankarani entre 1974 et 2019.*

Au regard de cette Figure, nous notons une augmentation de la savane, du sol nu/bâti et de la zone agricole au détriment de la forêt et du plan d'eau. En effet, ces derniers ont diminué d'espace de 70,3% et 77,4% respectivement. Quant aux autres unités, elles ont augmenté de 21,1% pour la savane, de 308,3% pour sol nu/bâti et de 174,6% pour la zone agricole.

### 4.3. Analyse de la pluviométrie

Les données de pluie annuelle, après avoir été agrégées à l'échelle du bassin versant par la méthode de Thiessen, ont été soumises au Test de Pettitt afin de détecter les années de rupture dans la série. Sur la Fig. 5 se présente l'évolution de la variable U du Test de Pettitt.

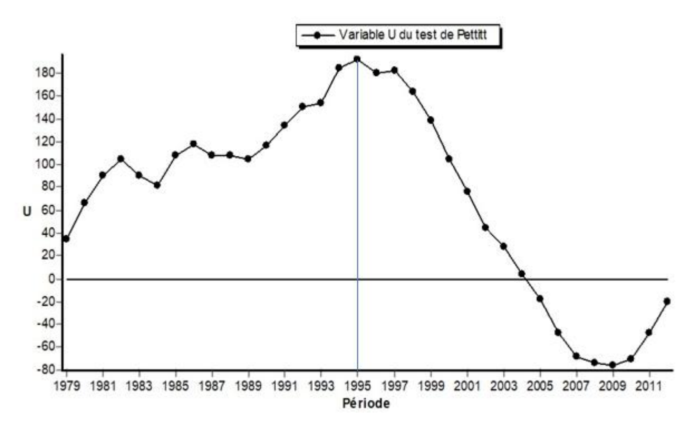



*Fig. 5: Evolution de la variable U du Test de rupture de Pettitt pour la série de pluies annuelles dans le bassin de Sankarani.*

Le Test de Pettitt a permis d'identifier 1995 comme l'année de rupture de la pluviométrie sur le bassin versant au seuil de confiance de 95%. Ce résultat concorde avec ceux d'autres études. En effet, Diawara (2019) a trouvé que depuis 1921, les décennies 1980-1990 et 1990-2000 ont été celles où il y'a eu les plus importantes diminutions de la pluie au Mali.

Ainsi, la distribution de l'indice de Nicholson pour la pluie sur la Fig. 6 nous montre clairement deux (2) périodes distinctes: 1980-1994 et 1995-2009. Pendant que pour la première période nous observons une situation de la pluviométrie annuelle de normale à excédentaire avec quelques années de sècheresse, pour la deuxième, pratiquement toutes les années s'avèrent déficitaires de modérées à fortes.

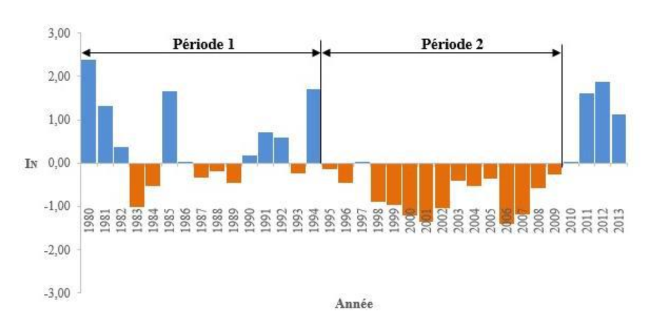



*Fig. 6: Distribution de l'Indice de Nicholson pour la pluviométrie annuelle dans le bassin de Sankarani.*

Cette figure semble aussi confirmer les études de Taylor et *al.* (2017), et Nouaceur (2020) par rapport à la reprise de la pluviométrie en Afrique de l'Ouest sahélienne car, en effet, à partir de 2010 nous observons le début d'une période plus humide dans le bassin versant de Sankarani.

### 4.4. Variation du bilan hydrique du bassin de Sankarani

Les résultats des évaluations des composantes du bilan hydrique du bassin versant de Sankarani pour les deux (2) périodes identifiées (1980-1994 et 1995-2009) se présentement dans le Tableau 2.

*Tableau 2 : Composantes du bilan hydrique du bassin versant de Sankarani*

| Périodes | Nb. d'années | P (mm) | E | | $h_Q$ | | ΔR | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | mm | % | mm | % | mm | % |
| Période 1 : 1980-1994 | 15 | 1455 | 1197 | 82,3 | 193 | 13,3 | 65 | 4,5 |
| Période 2 : 1995-2009 | 15 | 1328 | 1150 | 86,6 | 130 | 9,8 | 48 | 3,6 |
| Δ, en % | - | -8,7 | -3,9 | - | -32,6 | - | -26,2 | - |

Il ressort de ce tableau une diminution de tous les éléments du bilan de la période 1 à la période 2. Par contre, les degrés de variation sont très différents d'un élément à un autre. En effet, une réduction de 8,7% de la pluviométrie a entrainé respectivement des réductions de 3,9% de l'évaporation, jusqu'à 32,6% de l'écoulement et de 26,2% de la variation de réserve. Il ressort ainsi que l'écoulement est l'élément le plus sensible à la variation de la pluviométrie sur le bassin versant de Sankarani. Ce constat a déjà été fait par d'autres auteurs, notamment Bamba et *al.* (1996), Olivry (2002) et Paturel et *al.* (2010), pour d'autres sous-bassins versants du fleuve Niger.

Par ailleurs, par rapport à la quantité moyenne de pluies tombées, le taux d'évaporation a passé de 82,3% à 86,6% (variation de +4,3%) pendant que ceux de l'écoulement et de la variation de réserve ont passé respectivement de 13,3% à 9,8% (variation de -3,5%), et de 4,5% à 3,6% (variation de -0,9%). Ainsi, on constate qu'avec la diminution de la pluie, le phénomène d'évaporation s'est intensifié contrairement à l'écoulement et à la variation de la réserve.

## V. CONCLUSION

L'étude nous a permis d'évaluer le degré de dégradation du bassin versant de Sankarani due principalement aux activités anthropiques car, en effet, les espaces occupés par les sols nus/bâtis et les zones agricoles ont plus que doublé au détriment de la forêt et du plan d'eau, malgré la construction de la retenue d'eau du barrage de Sélingué. Et sur le plan du climat, elle a aussi permis de détecter deux périodes distinctes, de 15 ans chacune, dans la série des précipitations annuelles sur le bassin versant de Sankarani, par rapport à la rupture de 1994. Si pour la première période (1980-1994) la pluviométrie annuelle s'avère être de normale à excédentaire avec quelques années de sècheresse, pour la deuxième (1995-2009), pratiquement toutes les années s'avèrent déficitaires de modérées à fortes, par rapport à la normale de 1980 à 2013. Cette situation déficitaire de la pluie a eu certes comme effet la diminution de toutes les autres composantes du bilan hydrique du bassin versant de Sankarani, mais a été particulièrement négative pour l'écoulement qui a perdu 1/3 de son volume annuelle moyen.

## REFERENCES


[1] Andersen, I., Dione, O., Jarosewich-Holder, M., Olivry J.-C. (2006). Le Bassin du fleuve Niger : Vers une vision de développement durable, La Banque mondiale, 150 p.

[2] Assani, A.A., Buffin-Belanger, T., Roy, A.G. (2002). Analyse d'impacts d'un barrage sur le régime hydrologique de la rivière Matawin (Québec, Canada). Revue des sciences de l'eau. *Journal of Water Science*, 15(2), 557–574. https://doi.org/10.7202/705469ar

[3] Bamba, F., Mahé, G., Briquet, J.-P., Olivry, J.-C. (1996). Changements climatiques et variabilité des ressources en eau des bassins du haut Niger et de la cuvette lacustre. XIIèmes Journées hydrologiques de l'ORSTOM du 10 au 11 octobre, Montpellier, 27 p.

[4] Bangneres, J. (2015). L'aménagement de Sélingué au Mali. Encyclopédie de l'énergie, 11 p.

[5] Descroix, Luc, Diongue Niang, A., Panthou G., Bodian, A., Sane, Y., Dacosta, H., Malam Abdou, M., Vandervaere, J.-P., Quantin, G. (2015). Evolution récente de la pluviométrie en Afrique de l'ouest à travers deux régions : la Sénégambie et le bassin du Niger moyen. *Climatologie*, vol. 12, p. 25-43.

[6] Diawara, H. (2018). Analyse spatio-temporelle de l'écoulement fluvial du fleuve Niger au Mali sur le siècle 1911-2010. *Actes de conférence SustainEng*, 2iE, p. 29-35.

[7] Diawara, H. (2019). Analyse de l'évolution Contemporaine de la Température de l'air et des Précipitations sur le territoire du Mali. *European Scientific Journal*, ESJ, 15(2), 154. https://doi.org/10.19044/esj.2019.v15n2p154

[8] Ferry, L., Mietton, M., Fujiki, K., Laval, M.; Coulibaly, N., Braquet, N., Martin, D. (2018). Faiblesse de la sédimentation dans le barrage-réservoir de Sélingué (Mali-Guinée). Témoin de la stabilité des savanes sud-soudaniennes à l'échelle d'un grand bassin versant très peu anthropisé. G-Eau Working Papers No.5a. Montpellier, France.

[9] Ferry, L., Muther, N., Martin, D., Mietton, M. (2011). Les principaux bassins versants du Niger au Mali. In : Niger supérieur : quelques résultats de recherche sur les ressources et usages de l'eau. Paris (FRA), Marseille : UNESCO ; IRD, 2 p.

[10] Hathie, I., Doucoure, O., Bagayoko, A., Syllan, A., Bocoum, N., Macalou, B. (2017). Étude comparative de la valeur actuelle du barrage de Sélingué et de la situation du bilan financier de l'état, GWI, 46 p.
[11] Hassane, A., Kuper, M., Orange, D. (2000). Influence des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles du Niger supérieur sur l'onde de la crue du delta intérieur du Niger au Mali. *Sud Sciences & Technologies*, № 5, p. 16-31.
[12] Konate, S. (2003). Vulnérabilité et adaptation des ressources en eau aux effets des changements climatiques dans les bassins du Sankarani et du Baoulé, CNRST, 126 p.
[13] Kuper, M., Hassane, A., Orange, D., Chohin-Kuper, A., Sow, M. (2002). Régulation, utilisation et partage des eaux du fleuve Niger : Impact de la gestion des aménagements hydrauliques. In : Gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales. Orange Didier (ed.), Arfi Robert (ed.), Kuper Marcel (ed.), Morand Pierre (ed.), Poncet Yveline (ed.). Paris : IRD, 411-430. (Colloques et séminaires) ISBN 2-7099-1480-8 Séminaire international sur la gestion intégrée des ressources naturelles en zones inondables tropicales, Bamako, Mali, 20 Juin 2000/23 Juin 2000.
[14] Maiga, H., Marie, J., Morand, P., N'Djim, H., Orange, D. (2007). Présentation du fleuve Niger. *In : Avenir du fleuve Niger*, IRD éditions, p. 3-105.
[15] Mahé, G., Olivry, J.-C. (1995). Variations des précipitations et des écoulements en Afrique de l'Ouest et Centrale de 1951 à 1989. *Sécheresse*, n°1, vol 6, 109-117.
[16] Nicholson, S. E., Kim, J., Hoopingarner, J. (1988). Atlas of African rainfall and its interannual variability. Dept Meteorology, Florida State University, Tallahassee, Florida, USA.
[17] Nouaceur, Z. (2020). La reprise des pluies et la recrudescence des inondations en Afrique de l'Ouest sahélienne/Rain resumption and floods multiplication in western Sahelian Africa. *Physio-Géo*, Volume 15, p. 89-109.
[18] Olivry, J.-C. (2002). Synthèse des connaissances hydrologiques et potentielles en ressources en eau du fleuve Niger, 166 p.
[19] Olivry, J.-C., Bricquet, J.-P., Bamba, F., Diarra, M. (1995). Le régime hydrologique du Niger supérieur et le déficit des deux dernières décennies. In : Boulègue J. (ed.), Olivry Jean-Claude (ed.). *Colloques et Séminaires : Grands bassins fluviaux périatlantiques : Congo, Niger, Amazone*. Paris (FRA) : ORSTOM, 1993/11/22-24. ISBN 2-7099-1245-7. ISSN 0767-2896, p. 251-266.
[20] OMM. (2011). Guide des pratiques climatologiques, no 100.
[21] ORSTOM. (1970). Monographie hydrologique du bassin du Niger : 1ère partie, le Niger supérieur et le Bani.
[22] Ouatiki, H. (2014). Spatialisation des pluies et étude physiographique du sous bassin versant de Tillouguite à l'aide des outils de modélisation géospatiale. Mémoire de fin d'études, USMS, Maroc, 57 p.
[23] Paturel, J.-E., Servat, E., Kouame, B., Boyer, J. F., Lubes-Niel, H., Masson, J.M. (1995). Procédures d'identification de ruptures dans des séries chronologiques - modification du régime pluviométrique en Afrique de l'Ouest non sahélienne. *In : L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement (Actes de la conférence de Paris, mai 1995)*. IAHS Publ. no. 238, p. 99-110.
[24] Paturel, J.-E., Diawara, A., A. Siou, L.K., Talin E., Ferry, L., Mahé, G., Dezetter, A., Muther, N., Martin, D., Rouche, N., L'Aour-Cres, A., Seguis, L., Coulibaly, N., Bahire-Kone, S., Koite, M. (2010). Caractérisation de la sécheresse hydropluviométrique du Bani, principal affluent du fleuve Niger au Mali. Global Change : Facing Risks and Threats to Water Resources (Proc. of the Sixth World FRIEND Conference, Fez, Morocco, October 2010). IAHS Publ. 340.
[25] Paturel, J.-E., Servat, E., Delattre, M.O., Lubes-Niel, H. (1998). Analysis of rainfall long series in non-Sahelian West and Central Africa within a context of climate variability. *Hydrological Sciences Journal*, 43:6, p. 937-946.
[26] Roche, M. (1963). Hydrologie de Surface, Gauthier-Villars, Paris, 430 p.
[27] UNESCO/IRD. (2011). Niger supérieur : quelques résultats de recherche sur les ressources et usages de l'eau, Paris (FRA)/Marseille, 12 p.
[28] Taylor, C.M., Belušić, D., Guichard, F., Parker, D.J., Vischel, T., Bock, O., Harris, P.P., Janicot, S., Klein, C., Panthou, G. (2017). Frequency of extreme Sahelian storms tripled since 1982 in satellite observations. *Nature*, 544, p. 475-478.
[29] Turc, L. (1955). Le bilan d'eau des sols : relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement. In : Pluie, évaporation, filtration et écoulement. *Compte rendu des troisièmes journées de l'hydraulique*, Alger, 12-14 avril 1954. Tome 1, p. 36-44.